

SRT 2022 赛季油车

FRae 设计手册（比赛用）

SRT 空套组

2022/9

目录

1. 空气动力学理论知识.....	4
1.1 势流.....	4
1.2 力系数.....	4
1.3 气动中心.....	5
2. CFD 理论知识.....	5
2.1 湍流模型（涡粘性模型）	5
2.2 k- ϵ 湍流模型.....	5
2.3 可实现的 k- ϵ 湍流模型.....	6
2.4 壁面函数.....	6
2.5 CFD 宏文件.....	7
3. 赛车设计理念.....	8
3.1 渲染图.....	8
3.2 翼型数据.....	9
3.3 CFD 网格无关性验证.....	10
3.4 CFD 基本数据.....	11
3.4.1 下压力.....	13
3.4.2 阻力.....	14
3.4.3 升阻比.....	14
3.4.4 下压力中心.....	15
3.4.5 下压力分配.....	15
3.5 CFD 分部分析.....	16

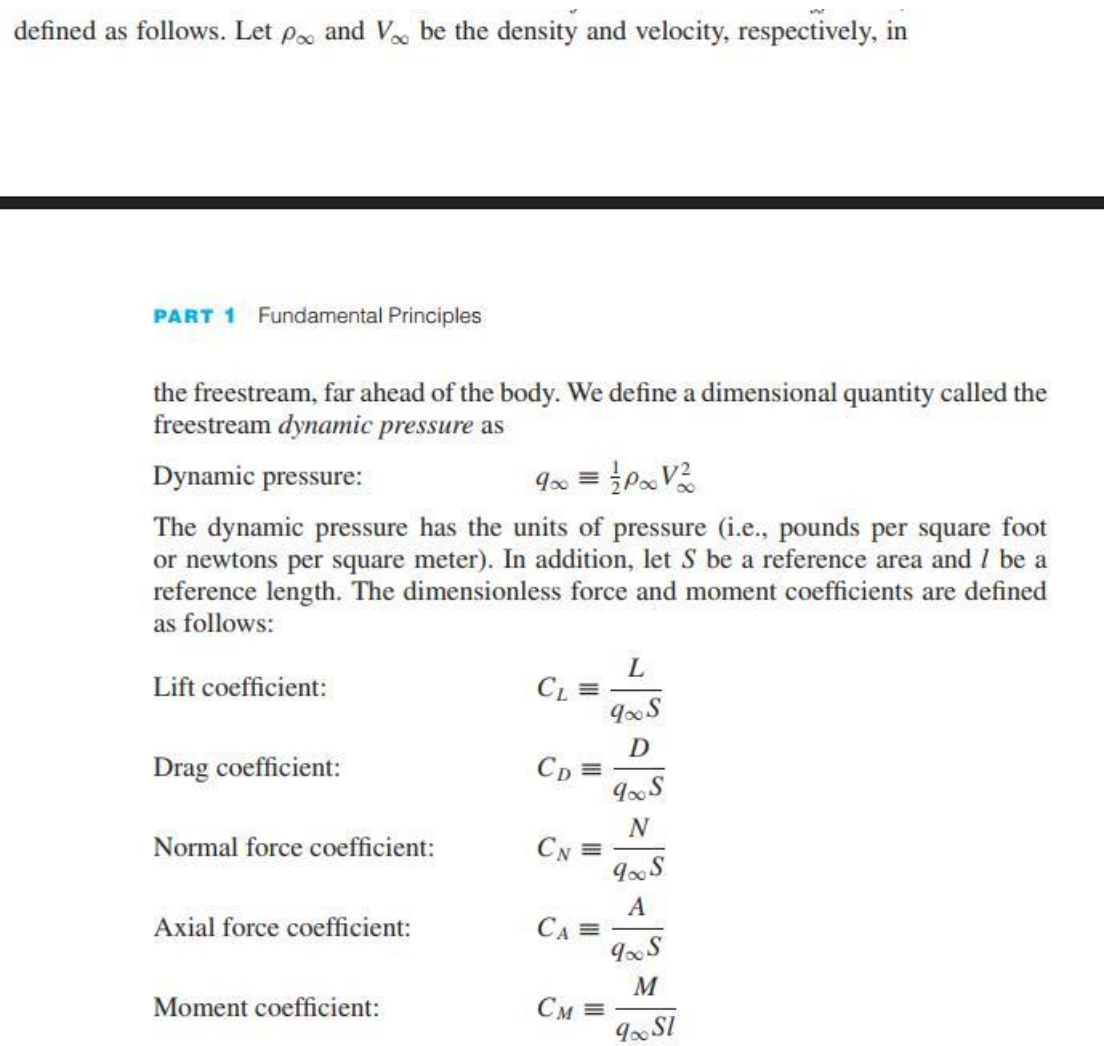
3.5.1 前翼.....	16
3.5.2 底板&侧箱	19
3.5.3 尾翼.....	21
3.6 稳定性 CFD 测试.....	23
3.6.1 离地间隙测试.....	23
3.6.2 俯仰角测试.....	28
4. 赛车实车数据.....	33
4.1skidpad 测试	33
5. 制造工艺.....	34
5.1 PMI 与 3D Core 芯材数据.....	34
5.2 真空袋压工艺.....	36
5.3 树脂导流工艺.....	37
5.4 模具成型.....	37
5.5 干碳法包边工艺.....	38
5.6 螺栓与紧固件.....	39

1. 空气动力学理论知识

1.1 势流

- FSAE 空气动力学采用势流模型
- 势流：速度场是某一标量函数（速度势）梯度的流
- 特性：旋度始终为零，复杂速度场可直接矢量求和
- FSAE 模型同时不考虑粘滞度，模型整体无旋无粘，恒密度，以方便简化
- 无粘条件：雷诺数较大但有限
- 恒密度条件：速度较低（远低于音速），恒密度=不可压缩

1.2 力系数



图表 1.1

1.3 气动中心

空气动力力矩为 0 的点

2. CFD 理论知识

2.1 湍流模型（涡粘性模型）

在涡黏性模型中，不直接处理雷诺应力项，而是引入湍流黏性系数。然后把雷诺应力表示为湍流黏性系数的函数，该模型的关键在于确定湍流涡粘度 u_t 。

T.V. Boussinesq 的涡黏性假设：湍流脉动所造成的附加应力也与层流运动应力那样可以同时均的应变率关联起来。

引入 Boussinesq 假设后，计算湍流流动的关键就在于如何确定 u_t 。

2.2 k-ε湍流模型

K-Epsilon 湍流模型是双方程模型，它可对湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 的传输方程进行求解，以确定湍流涡粘度 u_t 。

K-Epsilon 模型的各种形式已投入使用数十年，如今它已成为工业应用中最广泛使用的模型。自 K-Epsilon 模型问世以来，已进行了无数次改进。最显著的改进已包含在 Simcenter STAR-CCM+ 中。

K-Epsilon 模型适用于高雷诺数区域，发展充分的湍流。

K-Epsilon 模型的优缺点：

- 优点：可靠、收敛性好、内存需求低。

- 缺点：无滑移壁面、逆压梯度、强曲率流动以及射流流动不精确；耗散率不容易计算；具有各向同性假设

2.3 可实现的 k-ε 湍流模型

标准 K-Epsilon 模型对时均应变率特别大的情况，有可能导致负的正应力，这种情况是不可能实现的。因此为了保证计算结果的可实现性，对正应力进行某种数学约束。为了保证这种约束， C_μ 不再视为常数，而是与应变率联系起来——

可实现 K-Epsilon 模型包含湍流耗散率的新传输方程。此外，变量阻尼函数 f_μ C_μ （表示为平均流和湍流属性的函数）应用于模型的临界系数。此过程可使模型满足与湍流物理（可实现性）一致的法向应力上的特定数学约束。阻尼 C_μ 的概念也与边界层中的实验观察结果一致。

在很多应用中，此模型实际上优于标准 K-Epsilon 模型，通常至少可提供同样精确的结果。标准模型和可实现的模型均已通过两层方法选项在 Simcenter STAR-CCM+ 中提供，可使它们与精细网格一同使用，从而对粘性子层进行求解。在强流线弯曲、漩涡和旋转方面有更好的表现

2.4 壁面函数

以上的 K-Epsilon 是目前使用最多的湍流模型，但它仅适用于高雷诺数流动，对于近壁面低雷诺数流动我们需要一些特殊处理——壁面函数 Wall Function。

壁面函数法的基本思想：

1. 对湍流核心区的流动采用高雷诺数 K-Epsilon 的模型，在近壁区域不求解时均流场或湍流量的偏微分方程。

2. 在黏性底层内不布置任何节点，把与壁面相邻的第一个节点布置在旺盛湍流区域内（对数律层）。近壁的影响全部集中在第一个节点所在的控制体积内；此时壁面上的切应力与热流密度仍然按第一个节点与壁面上的速度和温度的一阶差分来计算。
3. 使用半经验公式将壁面上物理量与湍流核心区内相应的物理量联系起来，合理选择方程在节点处的有效扩散系数以及的边界条件，以使计算所得的切应力与热流密度能与实际情形基本相符合。

在 Star-CCM+中, 提供了两层方法, 它是低雷诺数方法的替代方法, 可以将 K-Epsilon 模型应用于粘性底层和过渡层。

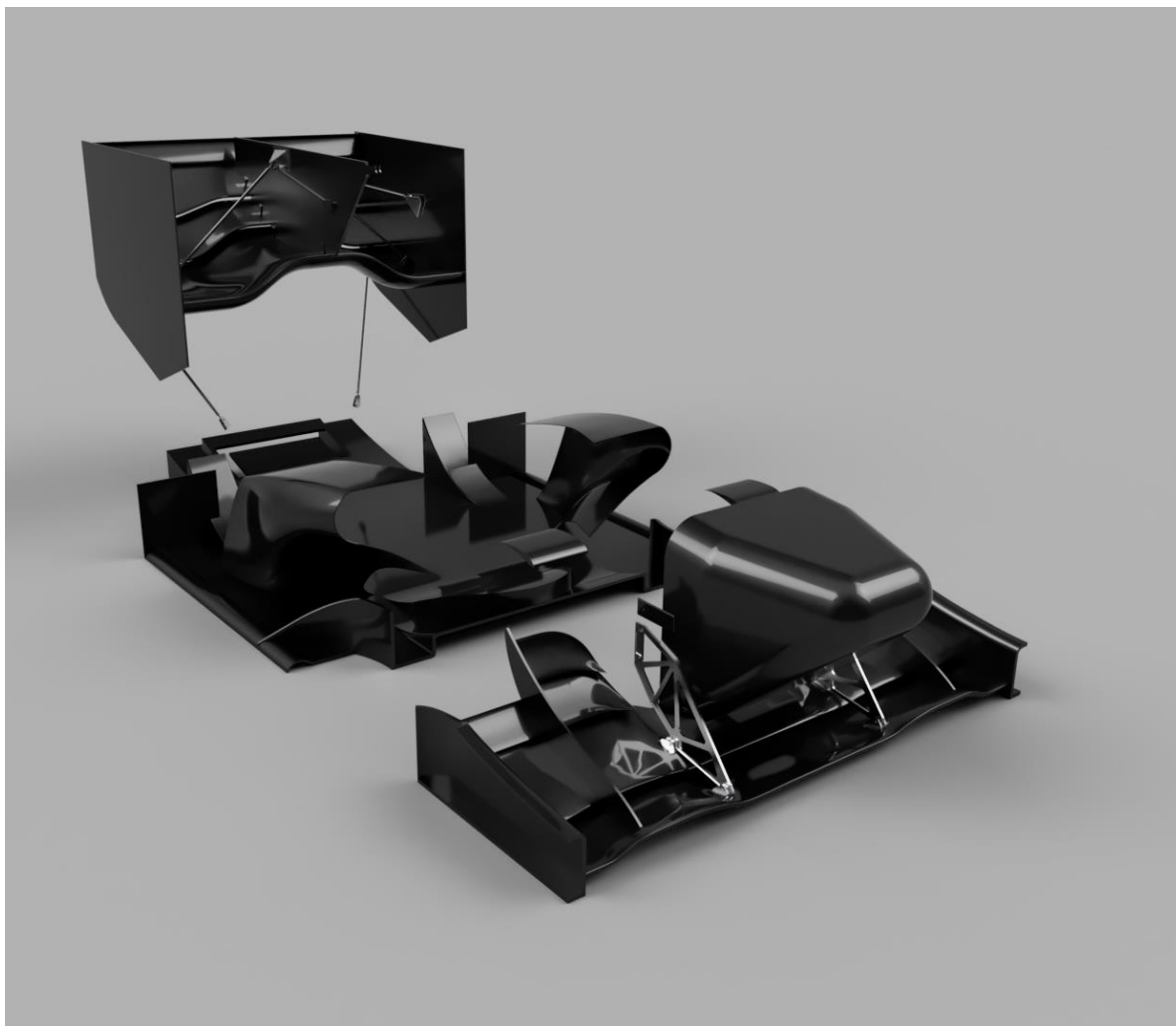
2.5 CFD 宏文件

Star-CCM+在每次运行 CFD 模拟时，都需单独设置各项模拟参数，设置过程对于不同的模型大同小异，然而手动设置相当耗费时间，影响测试效率。为改善这一点，本赛季 SRT 空套组学习了宏文件的编写与使用，并将其运用到 CFD 操作中，极大提升了模拟效率。

Star-CCM+使用 java 作为基础语言，可以通过直接编程或录制操作的方式录制 java 语言的宏文件。经过实验与迭代，SRT 空套组已经实现了从导入模型并按照规定命名法则建立区域与旋转坐标系后的全自动条件设置与网格划分。使用宏后可直接点击运行。宏文件同时设置有弹窗，可进行速度，空气密度等参数的客制化输入，并按输入参数对应计算其他参数。

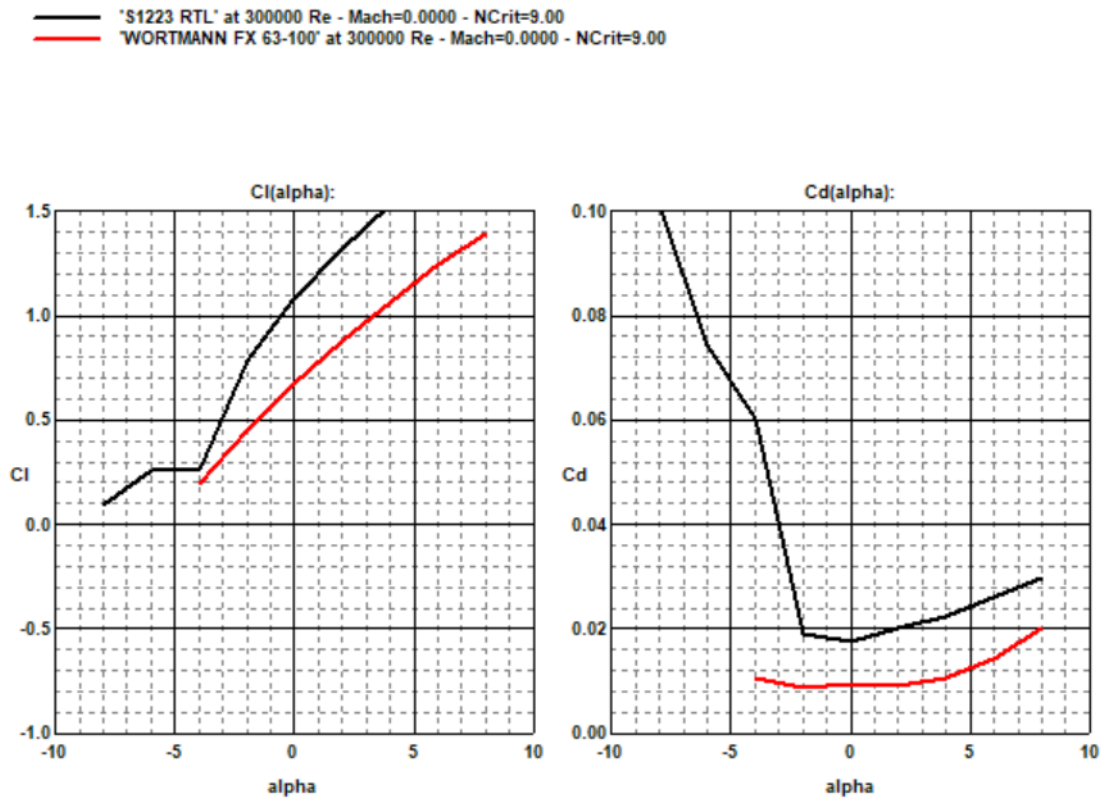
3. 赛车设计理念

3.1 渲染图



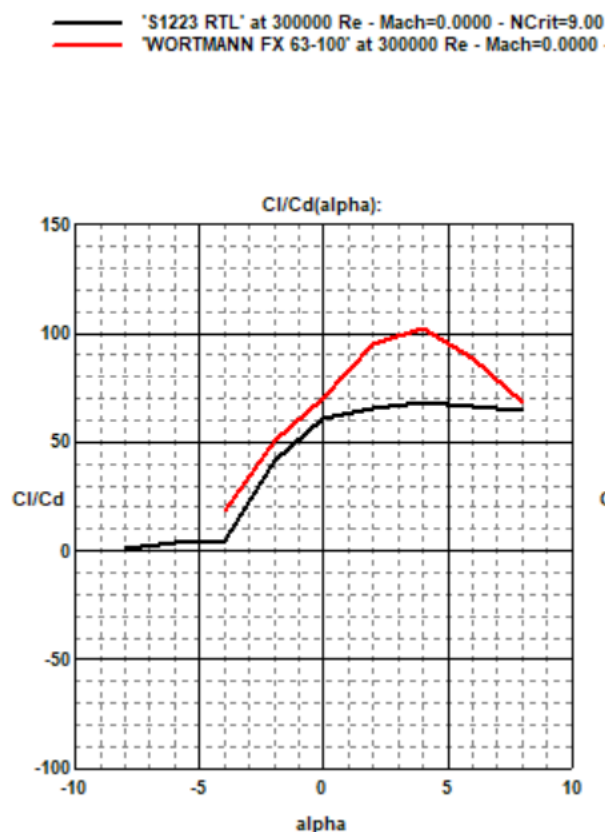
图表 3.1

3.2 翼型数据



图表 3.2.1

前翼主翼，尾翼主翼与其他大部分翼片采用 S1223RTL 翼型，其高 camber 的特性使得相比其他翼型，虽然升力峰值区间较窄，对 pitch 较为敏感，但升力数值有显著优势。



图表 3.2.2

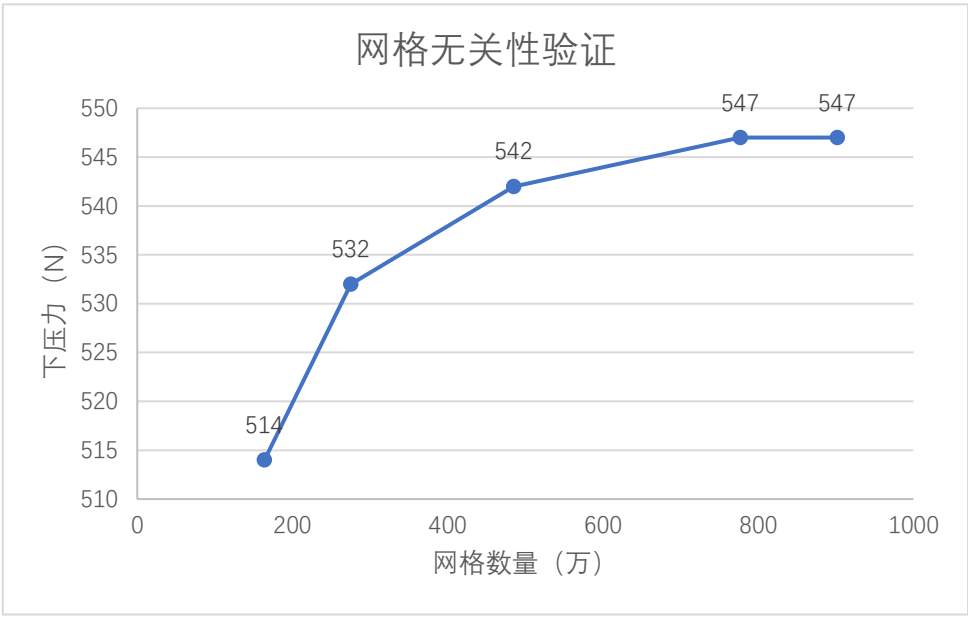
前翼襟翼使用 Wortmann FX63-100 翼型，其升阻比数据较为优异，形状也较为平缓，适合作为襟翼配合主翼产生抽吸作用。

3.3 CFD 网格无关性验证

CFD 中，网格精细度决定了模拟精度，密度过低的网格会导致数据不准确，而受制于算力，网格密度过高会导致模拟时间过长，影响效率。因此，有必要对同一个模型进行不同密度的网格划分，比对决定最佳网格精度，确保网格密度不影响模拟精确性。

测试使用了 60kph 工况，带悬挂的半车模型，使用 164 万，275 万，485 万，777 万，以及 902 万供 4 种网格划分进行测试。由于下压力数据数值较大，采用其作为对

比标准，测试结果如图所示：



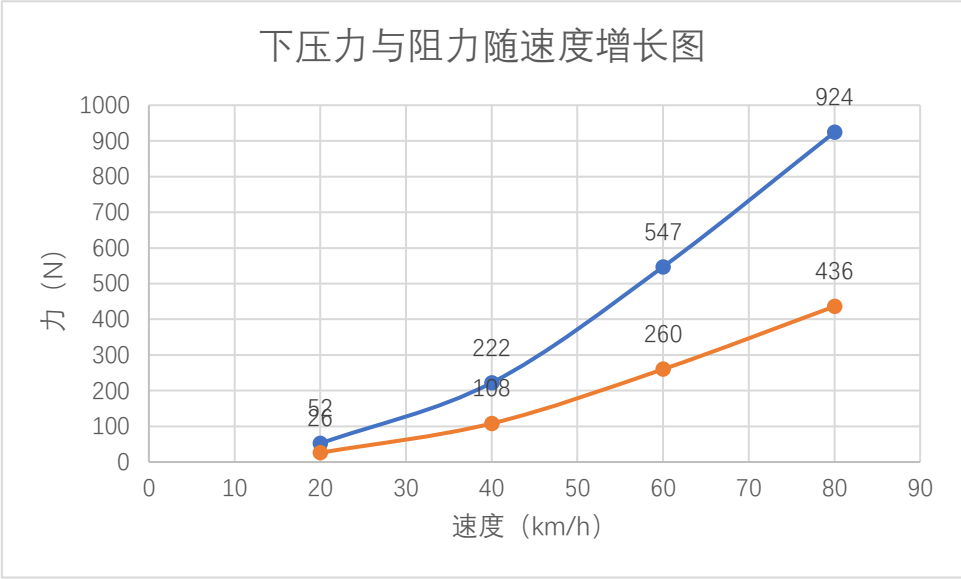
图表 3.3

可以发现 777 万向上的网格对数据的影响几乎可以忽略，而 777 万向下的网格对数据存在较大影响，因此选择 777 万网格，基础尺寸 0.1m 作为 CFD 参数。

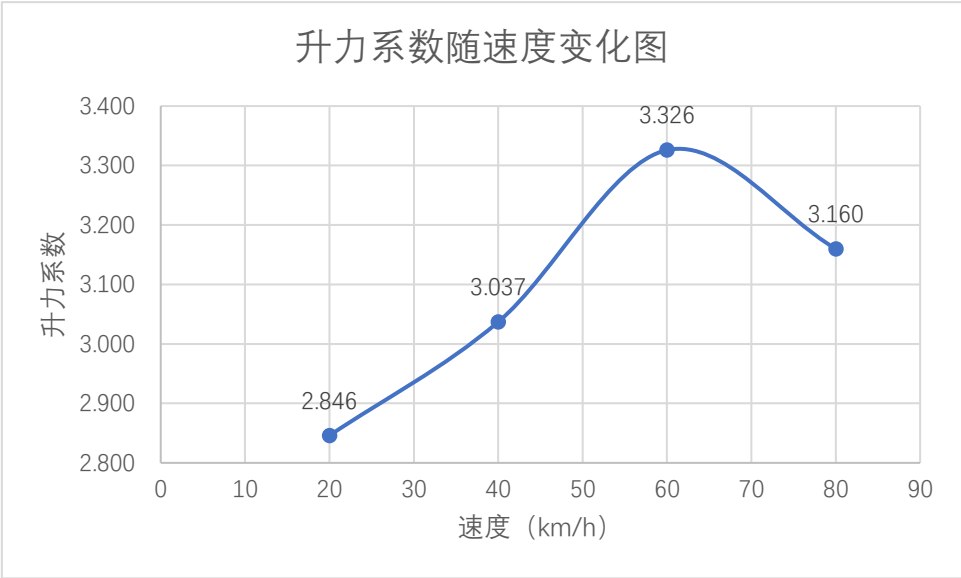
3.4 CFD 基本数据

基本 CFD 测试由在 777 万网格条件下，设置 20，40，60，80km/h 四种工况进行测试，使用半车模型，旨在测试整车下压力与阻力等各项参数在不同速度条件下的变化，验证空套设计合理性。

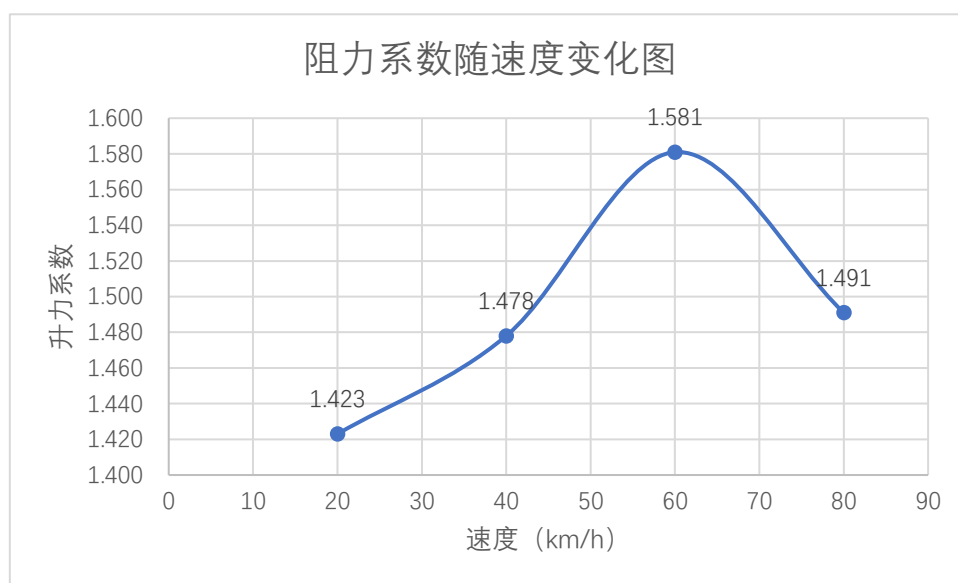
据队内资深车手反馈，60km/h 与 80km/h 约为 FSAE 低速与高速赛道的平均时速，因此将采用该两种工况呈现赛车各项数据的基本情况。同时，针对低速弯条件，采用 20km/h 与 40km/h 作为模拟工况，补全赛车空套的各项数值，确保空力效果的变化，观察空力特性变化，有助于帮助空套团队改进空套效果，也可以为车手提供操控信息。



图表 3.4.1 下压力与阻力随速度增长图



图表 3.4.2 升力系数随速度变化图



图表 3.4.3 阻力系数随速度变化图

3.4.1 下压力

速度 kph	80	下压力 N	924
	60		547
	40		222
	20		52

图表 3.4.4 整车下压力数值

速度 kph	80	升力系数 C_L/A	3.160
	60		3.326
	40		3.037
	20		2.846

图表 3.4.5 整车升力系数数值

与下压力数值高度依赖速度设置相比，升力系数乘以参考面积是更为合适的标准化下压力水平的工具。可以观测到，升力系数总体上超过了 3，对 FSAE 油车来说可以令人满意。

3.4.2 阻力

速度 kph	80	阻力 N	436
	60		260
	40		108
	20		26

图表 3.4.6 整车阻力数值

速度 kph	80	阻力系数 Cd·A	1.491
	60		1.581
	40		1.478
	20		1.423

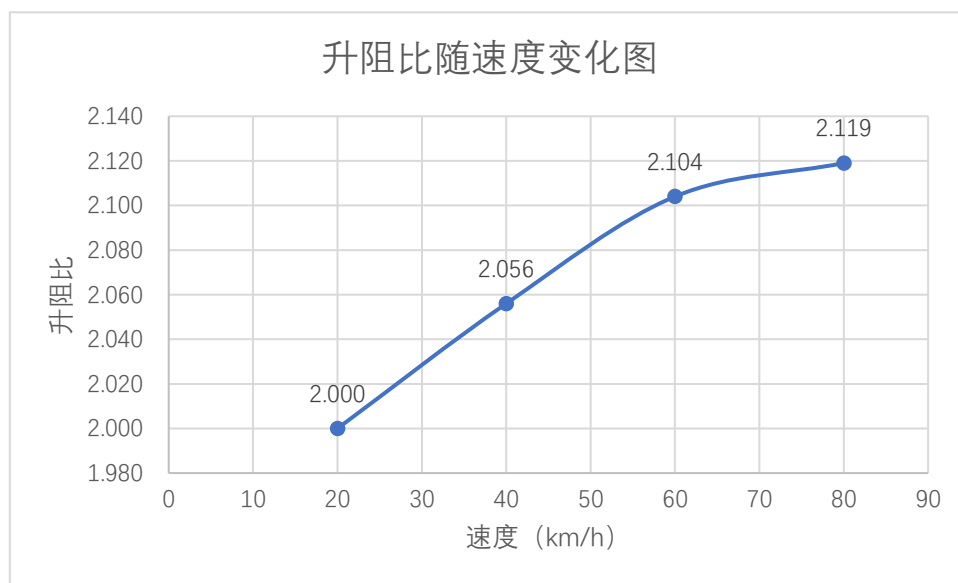
图表 3.4.7 整车阻力系数数值

全车阻力系数稳定在 1.5 上下的区间内，对 FSAE 赛车来说处于较低水平，较为低阻的设计有利于赛车发挥直道速度。

3.4.3 升阻比

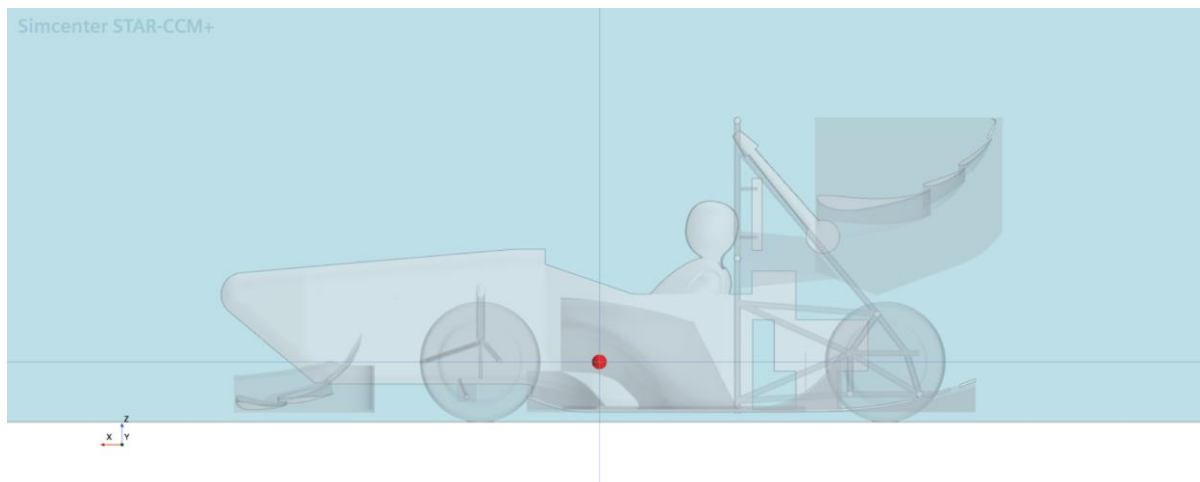
速度 kph	80	升阻比	2.119
	60		2.104
	40		2.056
	20		2.000

图表 3.4.8 整车升阻比数值



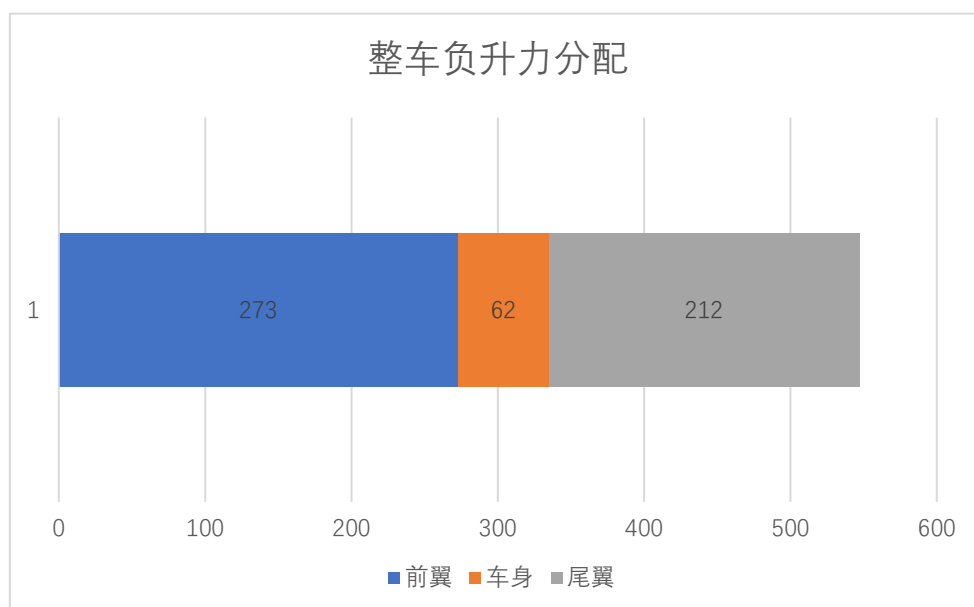
图表 3.4.9 升阻比随速度变化图

3.4.4 下压力中心



图中红点为 60km/h 时的下压力 x 轴中心位置，可以看到，下压力中心位于车手坐姿略微靠前的位置，可以补偿整车由于引擎质量而靠后的重心，将完整压力中心略微前移。

3.4.5 下压力分配



图表 3.4.10 整车负升力分配图

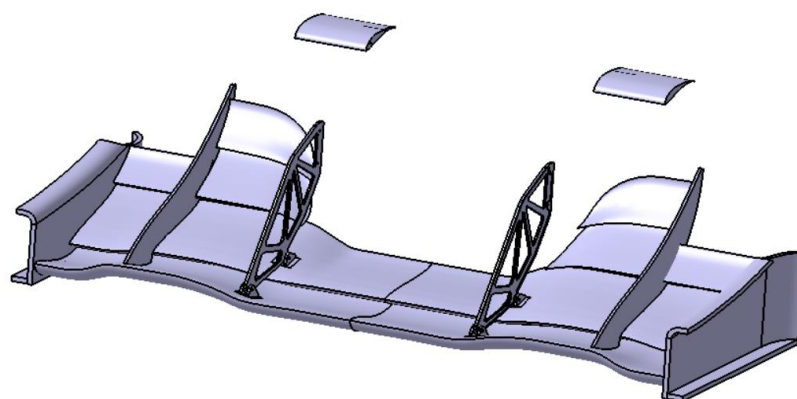
速度 kph	80	前翼升力 N	460	百分比	49.8%	车身升力 N	102	百分比	11.0%	尾翼升力 N	362	百分比	39.2%
	60		273		49.9%		62		11.3%		212		38.8%
	40		110		49.5%		24		10.8%		88		39.6%
	20		26		50.0%		5		9.6%		21		40.4%

图表 3.10.11 整车负升力分配数据

可以观测到，在不同速度条件下，整车负升力分配始终呈较稳定的状态，前翼贡献接近 50%的下压力，尾翼贡献约 40%，而车身贡献 10%。该分配较为合理，考虑到整车重心分配约为前后 4：6，前部高下压力有利于提升车头稳定性与指向性，尾部下压力有助于压制车尾摆动，提升稳定性。受制于单体壳形状产生正升力以及举升杆与副车架影响扩散器效率，车身产生的下压力较小，但处于可以接受的范围内。

3.5 CFD 分部分析

3.5.1 前翼

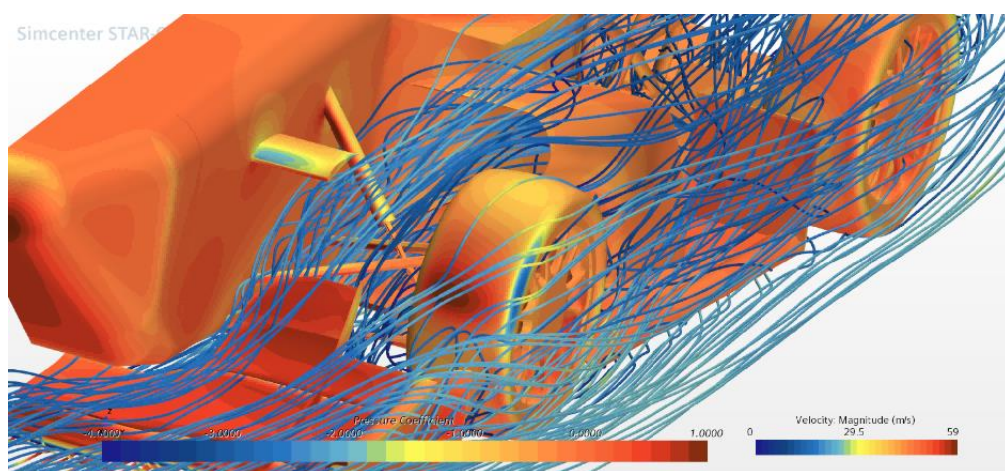


图表 3.5.1

前翼采用双主翼设计，显著提高了前翼升阻比，第一片主翼选用激进的负攻角 S1223 RTL 翼型，其头部较大，能更好的加速下方气流；第二片主翼选用较为平缓的 Wortmann FX63-100 翼型，在提高主翼攻角的同时，增强对气流的抽吸作用，充分利用地面效应。同时，车身下方部分前翼攻角降低，为底板进气留出空间。前翼襟翼的翼端设计了涡流发生器，能产生类似 F1 赛车的 Y250 涡流入侧箱进气口，增大进气量，同时加速尾翼

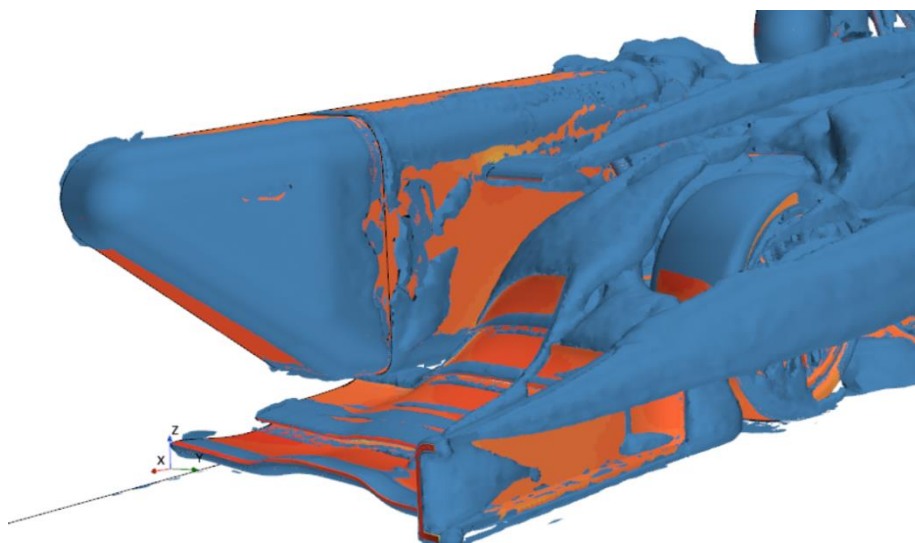
下表面气流。前翼端板采用外洗设计，端板上沿导流板可产生绕过前轮的涡流，可诱导气流绕过轮胎，减小阻力；端板下沿导流板可一定程度上阻挡侧方气流进入前翼下方，增加下压力。

前翼后方的 whisker 设计可以减小高攻角襟翼所带来的上洗，并配合前翼涡流发生器加速气流，使得尾翼发挥更大的作用。模拟结果表明，增加 whisker 可以在牺牲 30N 左右前部下压力的同时，增加 100N 左右的尾翼下压力。



图表 3.5.2

由 7075 铝 cnc 加工的前翼车身连接件由 ANSYS 拓扑优化设计，高鼻锥设计保证了车身上表面的气流流畅度。



图表 3.5.3

从涡流图部分可看出，Whisker 以及前翼端板产生的涡流明显并且得到充分利用。



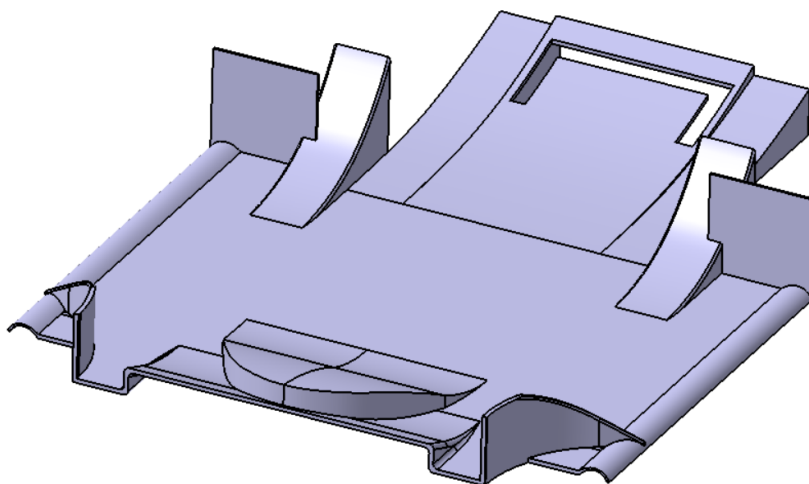
图表 3.5.4 Y=0m 云图



图表 3.5.5 Y=0.4m 云图

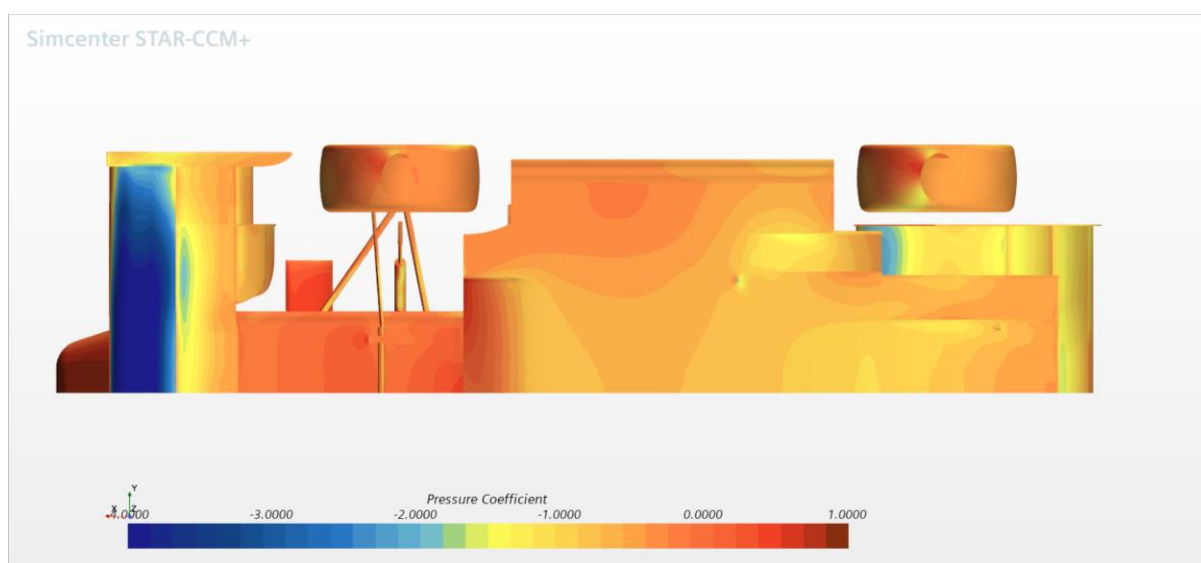
而从速度云图来看：前翼气流加速明显，鼻锥也起到了向底板引导气体的作用。

3.5.2 底板&侧箱

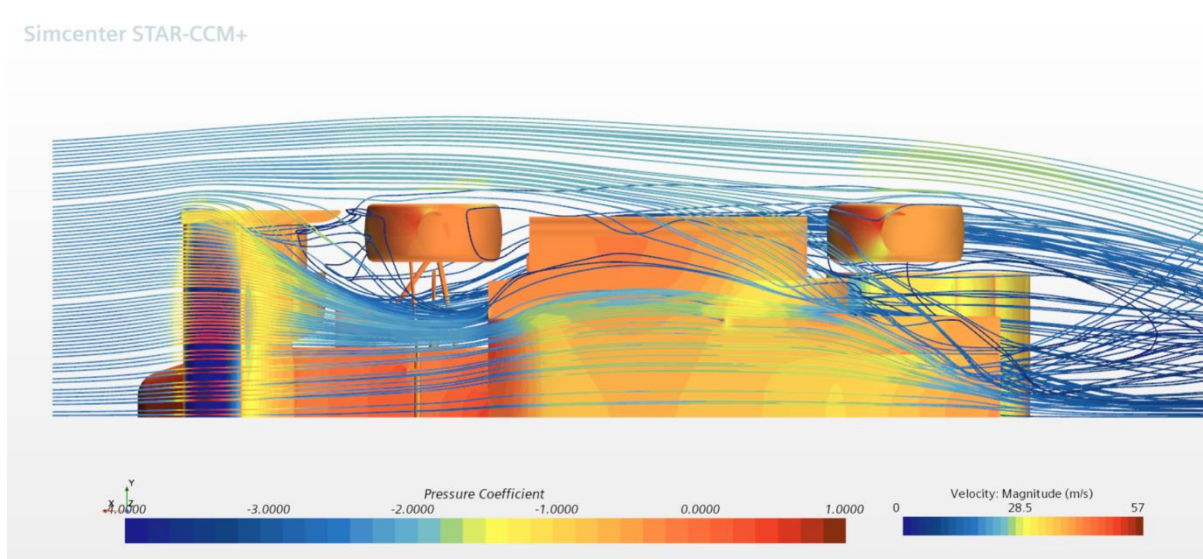


图表 3.5.6

底板系统负责梳理车身下表面气流，并利用文丘里效应加速气流产生下压力。角度经过 2D 模拟仿真，保证最大幅度地增加底板的抽吸作用。底板进气口经过 CFD 仿真优化，产生附面层，推开湍流，有效避开前轮射流干扰以达到最佳进气效果。

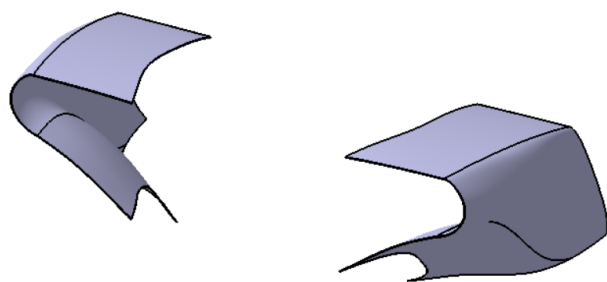


图表 3.5.7



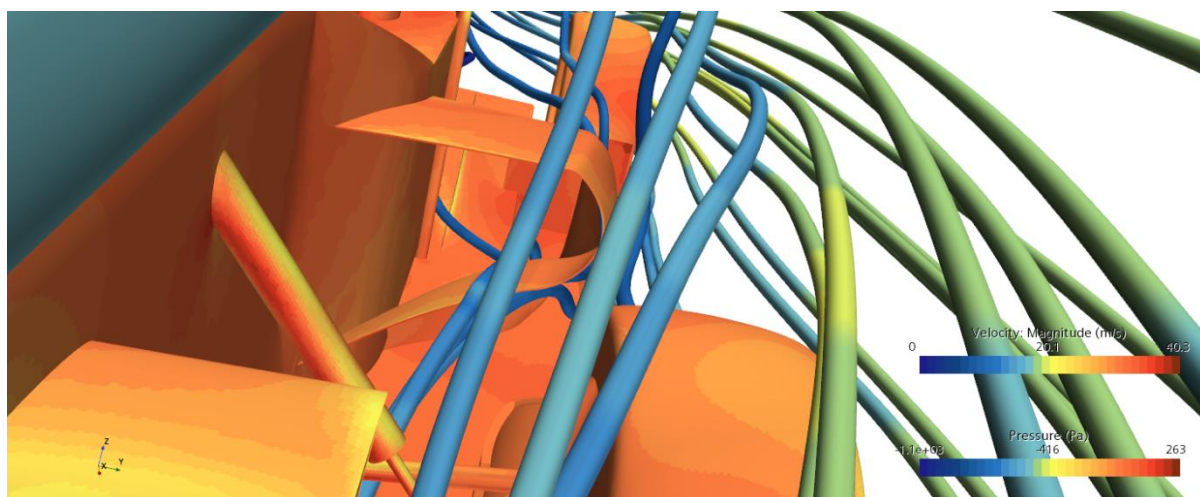
图表 3.5.8

进气口两侧的导流板能一定程度上阻止轮胎射流进入进气口。后轮前的扰流板产生高压区，使气流避开后轮，起到减阻作用。底板侧沿设置涡流发生器以阻挡侧方气流进入。



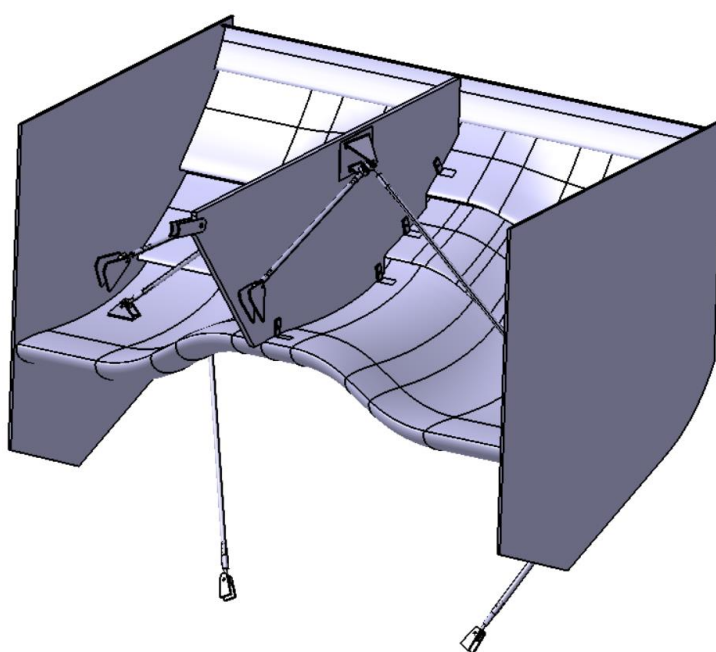
图表 3.5.9

侧箱系统通过 CATIA 自由风格曲面建模，为进入进气口的气流减速以达到理想散热效率。侧箱上表面有下切设计，将上表面气流导至尾翼下表面；而下表面外切，可以有效地推开乱流。

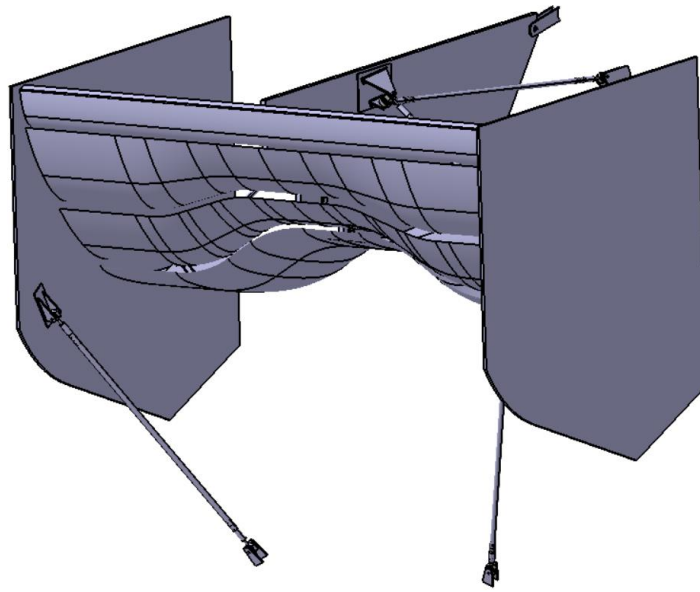


图表 3.5.10

3.5.3 尾翼

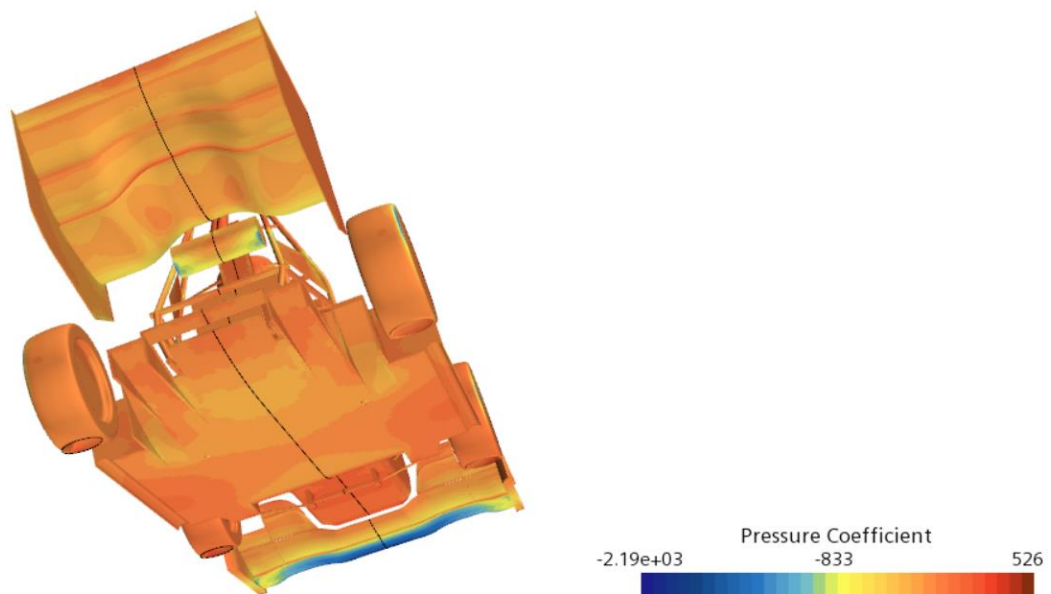


图表 3.5.11

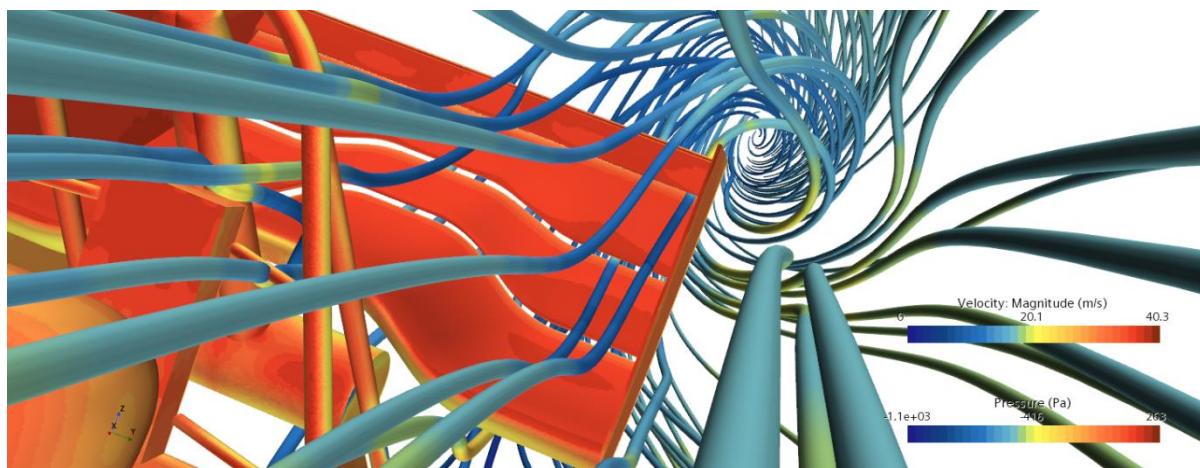


图表 3.5.12

尾翼负责产生尾部下压力，其独特的变截面翼型设计充分利用主环两侧的空间供尾翼延伸，能有效避开车手后方的低压区以充分利用后方空间的干净气流。同时，主翼中段采用了不同的攻角设计，以应对由主环及头枕造成的气流下洗。鲨鱼鳍连接件和巨大的端板保证了车辆动态的稳定性。



图表 3.5.13



图表 3.5.14

3.6 稳定性 CFD 测试

3.6.1 离地间隙测试

在赛车实际运行中，路面状况、行驶状态等因素会造成赛车离地间隙的变化，进而影响赛车稳定性、各空套部件气动特性。因此，需要通过改变离地间隙的大小，对整车进行 CFD 仿真模拟，验证赛车在不同离地间隙下的稳定性。

在仿真软件 Star-CCM+中，沿用整车模型中坐标系作为参考坐标系，沿车身指向前翼方向设置为 x 轴正方向，垂直地盘向上为 z 轴正方向，沿轮胎轴为 y 轴，并与 x 轴、z 轴形成右手坐标系。车身底盘最低处与地面的距离为本仿真所定义的离地间隙 h，改变离地间隙 h 的大小，选取 h=54mm、56mm、58mm、60mm、62mm 进行 CFD 仿真测试，研究整车以及各空套部件气动特性随离地间隙大小的变化，从而研判所设计的空气动力学套件在不同工况下所发挥的作用。

对不同离地高度下赛车的气动特性进行仿真。首先，通过 CATIA 改变赛车离地间隙大小，再使用 Star-CCM+设置流体域、边界条件、划分网格，并进行仿真。本组仿真设计速度为 60kph。

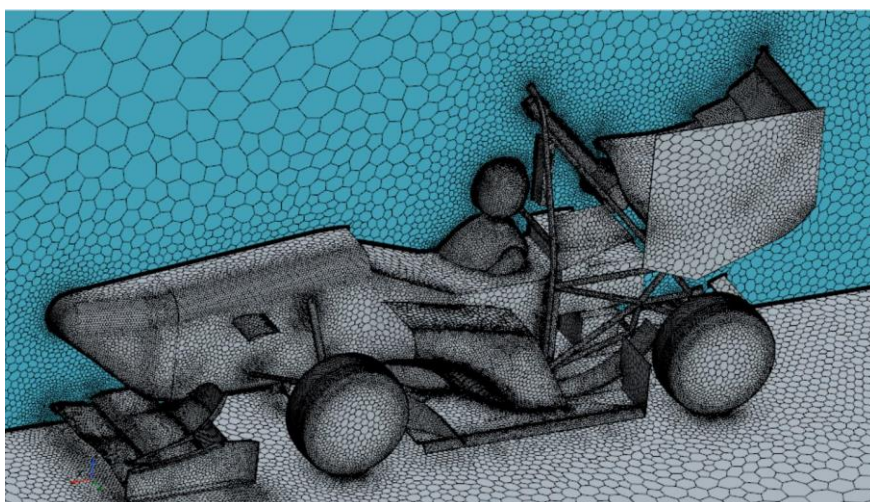
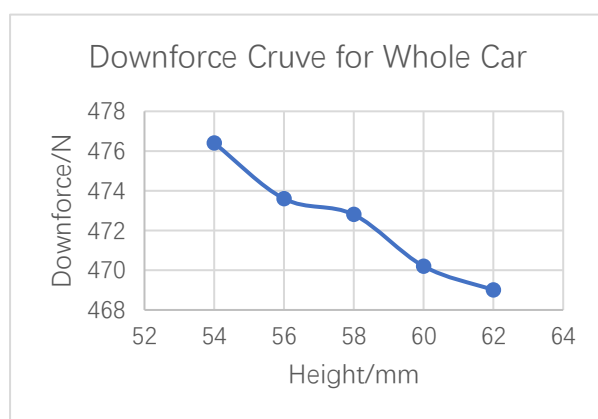


图 3.6.1 离地间隙仿真网格划分

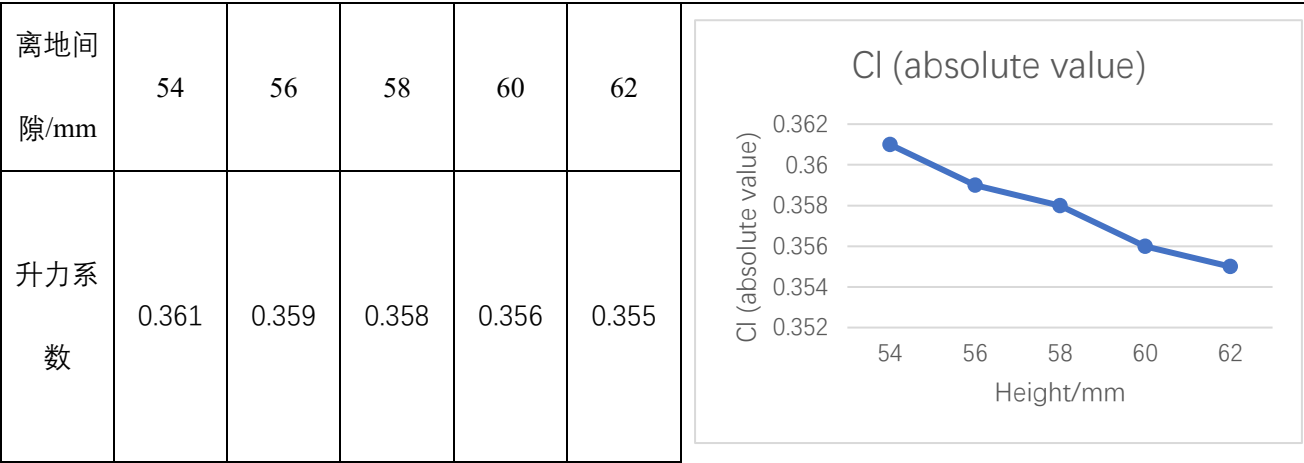
将仿真计算结果进行分析。

首先对于整车和车身各部件的下压力进行分析。对于整车，随着离地间隙的增大，下压力逐渐减小。在标准工况 54mm 情况下可以达到 476.4 N 的下压力，而在边界工况 62mm 的情况下只有 234.5 N 的下压力。同时，对于升力系数而言，随着离地间隙的增大，升力系数绝对值逐渐减小，在标准工况 54mm 情况下可以达到 0.361 的升力系数，而在边界工况 62mm 的情况下该数据为 0.355。说明车身离地间隙越小，赛车具有更大的下压力和升力系数（绝对值）。

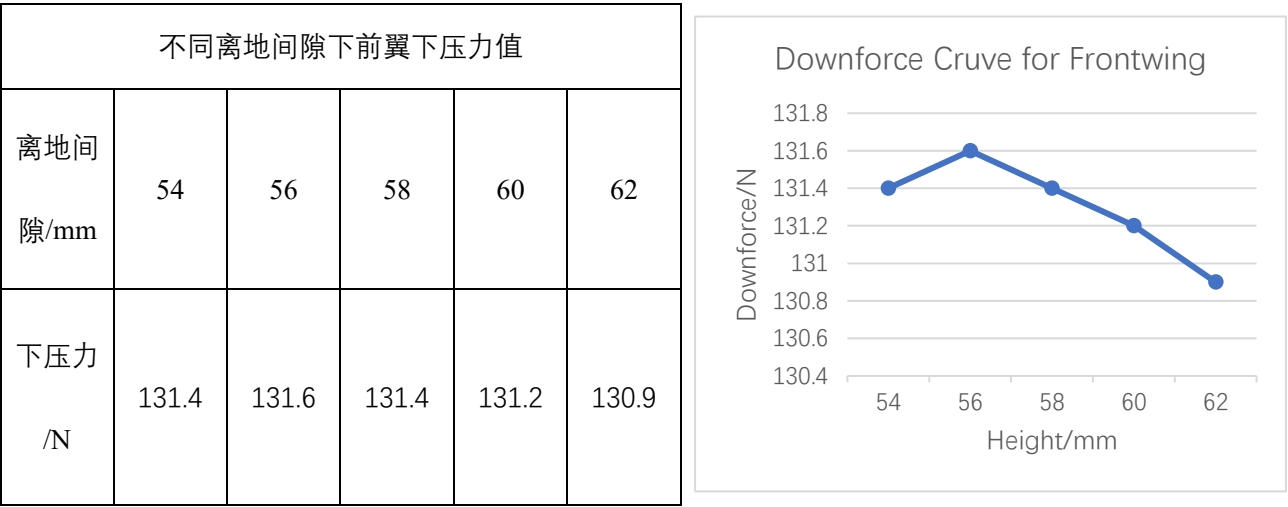
不同离地间隙下整车下压力值					
离地间隙/mm	54	56	58	60	62
下压力 /N	238.2	236.8	236.4	235.1	234.5



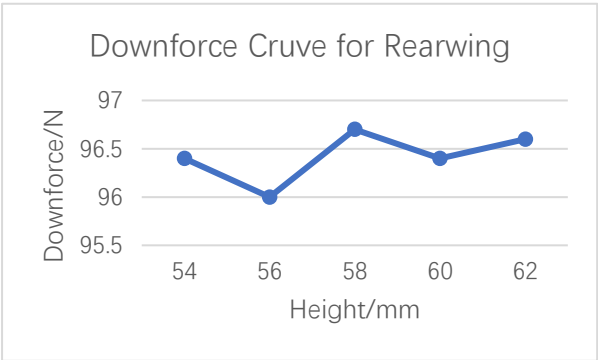
不同离地间隙下整车升力系数值



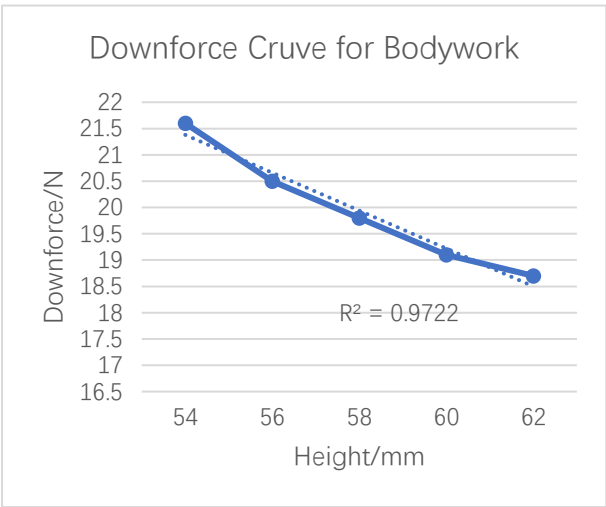
对车身其他空气动力学套件进行下压力分析可以发现，下压力主要是由前翼和尾翼提供，通常情况下车身所提供的下压力只占全部下压力的 8.4%左右。与前所述的下压力变化类似，赛车前翼、车身部分的下压力基本上也是随着离地间隙的减小而增大，其中车身部分离地间隙-下压力折线图线性相关度更高（经计算 $R^2=0.9722$ ），说明车身部分气动特性对离地间隙的变化很敏感；而尾翼部分下压力随离地高度的变化不明显，说明尾翼气动特性与离地间隙的大小相关度不高。



不同离地间隙下尾翼下压力值					
离地间隙/mm	54	56	58	60	62
下压力/N	96.4	96.0	96.7	96.4	96.6



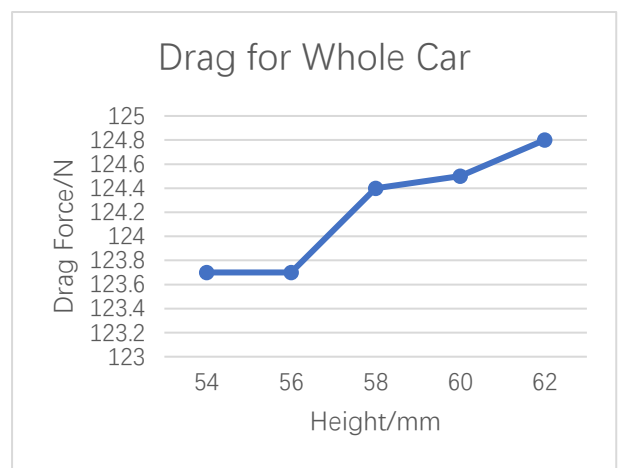
不同离地间隙下车身下压力值					
离地间隙/mm	54	56	58	60	62
下压力/N	21.6	20.5	19.8	19.1	18.7



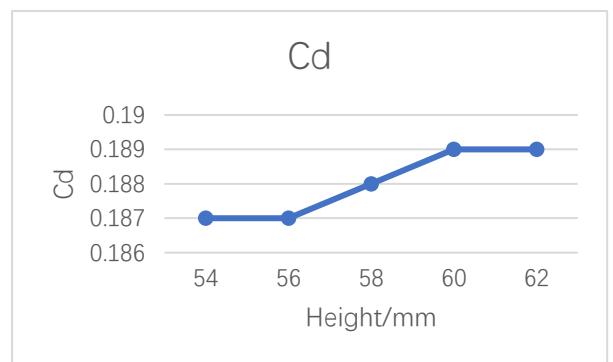
最后分析不同离地间隙下的阻力变化。可以看出，随着离地间隙的增大，整车所受阻力值略有增加，平均值为 124.22 N，标准差 0.497；而阻力系数则保持在 0.188 附近，标准差达到 0.001。总而言之，整车在不同离地间隙下的阻力和阻力系数整体较为稳定。说明对于本车不会因离地间隙变化而导致气动阻力的强烈变化，进而影响赛车的动态特征，验证了整车不同离地间隙下在阻力方面的 CFD 稳定性。

不同离地间隙下整车阻力值

离地间隙/mm	54	56	58	60	62
阻力/N	123.7	123.7	124.4	124.5	124.8



不同离地间隙下整车阻力系数值					
离地间隙/mm	54	56	58	60	62
阻力系数	0.187	0.187	0.188	0.189	0.189



本报告中使用 Star CCM+对整车进行了离地间隙 CFD 稳定性的测试和分析。数据表明在 54mm-62mm 区间内，整车下压力变化趋势具有一致性且在合理的变化范围内能保持较高下压力，同时，阻力和阻力系数能够保持稳定，具体结论如下：

1.随着离地间隙的减小，下压力逐渐增大，升力系数的绝对值也逐渐增大。其中，车身部分提供的下压力随离地间隙的变化较为显著，但由于其仅占整车下压力的较小部分，故对整车下压力影响不明显；而赛车前翼和尾翼为整体提供了绝大部分的下压力，这两部分下压力大小随离地间隙的变化不显著，从而保证了整车下压力在合理的离地间隙范围内能够处于较高值且稳定。

2.随着离地间隙的减小，整车的阻力和阻力系数能够保持稳定，在测试案例中数据

的标准差较小，能够说明在赛车离地间隙变化时，系统的阻力能够保持在较为稳定的范围内。

3.6.2 俯仰角测试

在赛车的实际运行中，不平的路面会造成赛车俯仰角的变化，在路面随机起伏影响下的俯仰角波动会对赛车动态稳定性、整车气动特性和车手安全产生较大的影响。因此，需要通过改变俯仰角大小，对整车 CFD 稳定性进行测试验证。

在仿真中，沿用坐标设置方法，车身方向为 x 轴，轮胎轴方向为 y 轴，垂直底盘向上为 z 轴方向，令车身绕 y 轴旋转的角度是本仿真所定义的俯仰角 β ，改变俯仰角 β 的大小，分别进行 CFD 气动特性的计算仿真，研究其随俯仰角大小变化的特性，从而研判所设计空气动力学套件在复杂路面工况下对车身俯仰变化稳定性的保持作用。选取俯仰角度分别为 0° 、 -0.4° 、 -0.8° 、 -1.2° 、 -1.6° 、 -2.0° 。

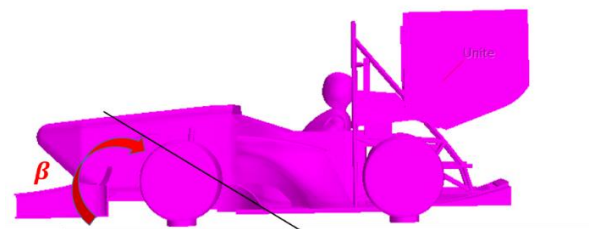


图 3.6.2 车身俯仰角示意图

对不同工况下的俯仰角气动特性仿真，通过 CATIA 改变赛车俯仰角设置并建立流
体域；使用 Star CCM+设置边界条件、划分网格，并进行 CFD 仿真。

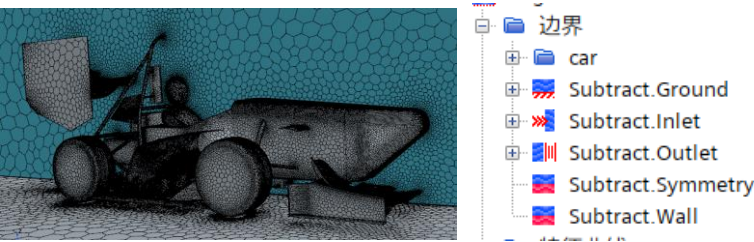
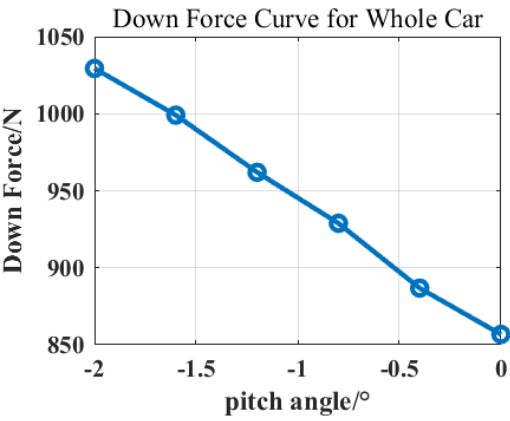


图 3.6.2-2 车身俯仰角仿真 CFD 设置

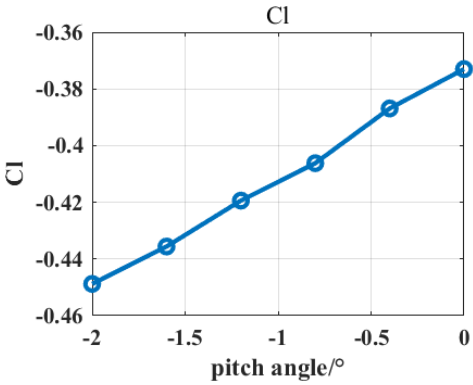
将仿真计算结果进行分析。

首先对于整车和车身各部件的下压力进行分析。对于整车，随着俯仰角绝对值的增大，下压力逐渐增大。在标准工况 0°情况下可以达到 856.76 N 的下压力，而在边界工况-2.0°的情况下则可以达到 1029.4 N 的下压力。同时，对于升力系数而言，随着俯仰角度绝对值的增大，负升力系数绝对值逐渐增大，在标准工况 0°情况下可以达到-0.3733 的下压力，而在边界工况-2.0°的情况下则可以达到-0.4488。说明当车身俯仰向前倾时，俯仰角度越大，赛车具有更大的下压力和负升力系数（绝对值）。

不同俯仰角下整车下压力值						
俯仰 角度/°	0	-0.4	-0.8	-1.2	-1.6	-2
下压力/N	856.76	886.8	928.9	962.0	999.1	1029.4

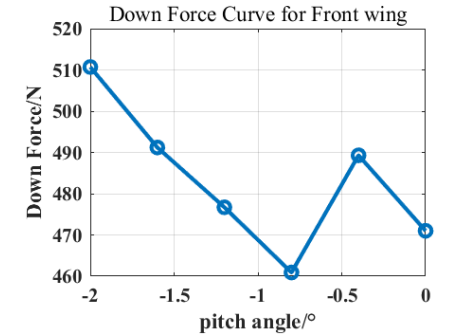


不同俯仰角下整车升力系数值						
俯仰 角度/°	0	-0.4	-0.8	-1.2	-1.6	-2
升力 系数	0.3733	0.3869	0.4062	0.4194	0.4356	0.4488

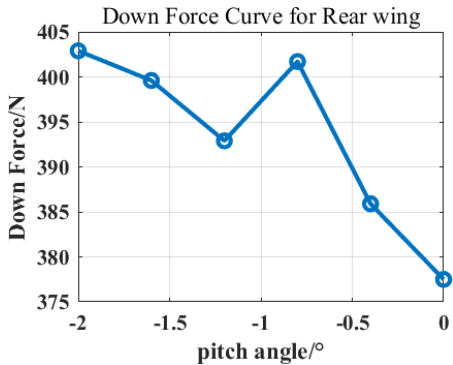


而对车身其他空气动力学套件进行下压力分析可以发现，下压力主要是由前翼和尾翼提供，通常情况下车身所提供的下压力只占全部下压力的 5%左右。与前所述的下压力分布类似，赛车各个部分上的下压力基本上也是随着俯仰角度绝对值的增大而增大，结论具有一致性。

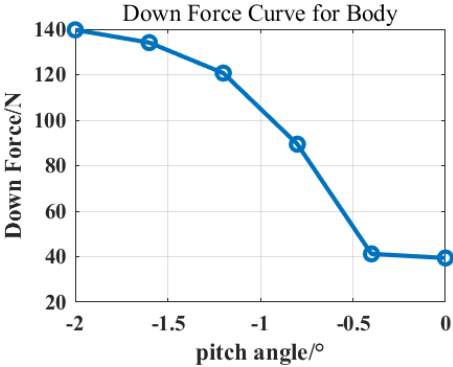
不同俯仰角下前翼下压力值						
俯仰 角度/°	0	-0.4	-0.8	-1.2	-1.6	-2
下压力/N	471.0	489.3	460.9	476.7	491.2	510.7



不同俯仰角下尾翼下压力值						
俯仰 角度/°	0	-0.4	-0.8	-1.2	-1.6	-2
下压力/N	377.5	385.9	401.7	392.9	399.6	402.9

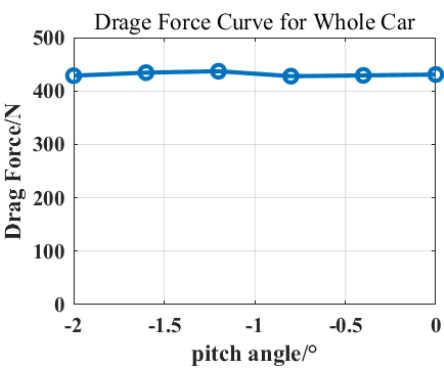


不同俯仰角下车身下压力值						
俯仰 角度/°	0	-0.4	-0.8	-1.2	-1.6	-2
下压力/N	39.41	41.22	89.43	120.7	134.1	139.7

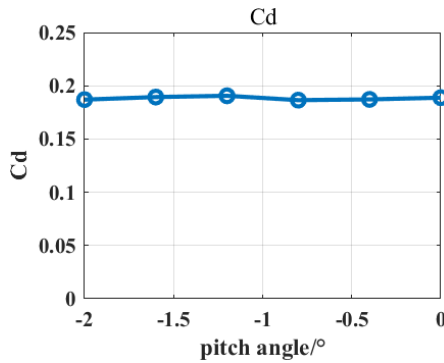


最后分析不同俯仰角度下的阻力变化。可以看出，随着俯仰角度的变化，整车所受阻力值保持在 431.4 N 附近，标准差达到 3.33；而阻力系数则保持在 0.1883 附近，标准差达到 0.001473。总而言之，对于整车在俯仰角度下的阻力和阻力系数分析中，整体较为稳定。说明对于本车俯仰工况，整体阻力能够保持在一定范围内，不至于因俯仰角度变化而导致气动阻力的强烈变化，进而影响赛车的动态特征，验证了整车俯仰工况在阻力方面的 CFD 稳定性。

不同俯仰角下整车阻力值						
俯仰 角度/°	0	-0.4	-0.8	-1.2	-1.6	-2
下压力/N	431.4	429.2	427.7	437.0	434.4	428.6



不同俯仰角下整车阻力系数值						
俯仰 角度/°	0	-0.4	-0.8	-1.2	-1.6	-2
阻力系 数	0.1888	0.1872	0.1865	0.1906	0.1894	0.1870



本报告中使用 Star CCM+对整车进行了俯仰角 CFD 稳定性的测试和分析。数据表明在 0-2 度的俯仰角区间内，整车下压力变化趋势具有一致性且在合理的变化范围内能保持较高下压力，同时，阻力和阻力系数能够保持稳定，上述测试数据与案例说明本设计保证了空气动力学套件在加速与刹车等环节中的稳定性，具体结论如下：

1、随着负俯仰角绝对值的增大，下压力逐渐增大，负升力系数的绝对值也逐渐增大。

且赛车前翼和尾翼为整体提供了绝大部分的下压力，而车身本身提供的下压力进站整体的较小部分。同时，数据说明，在合理的俯仰角变化范围内，整车的下压力能够处于保证较高值且变化趋势稳定。

2、随着负俯仰角绝对值的增大，整车的阻力和阻力系数能够保持稳定，在测试案例中数据的标准差较小，能够说明在赛车俯仰变化时，系统的阻力能够保持在较为稳定的范围内。

4. 赛车实车数据

4.1skidpad 测试

数据				
	逆时针无空套 s	顺时针无空套 s	逆时针带空套 s	顺时针带空套 s
	6.61	6.5	6.29	6.28
	6.56	6.62	6.28	6.38
	6.66	6.31	6.07	6.59
	6.31	6.7	6.52	6.17
			6.20	6.45
平均值	6.535	6.5325	6.272	6.374
平均速度 kph	33		36	
	侧向g值			
	0.88	0.87	0.98	0.97
基础数据				
定圆半径 m	7			
赛车质量 kg	325	赛车+车手质量		

图表 4.2.1 定圆测试数据

试车中进行了定圆测试，并记录了顺逆时针对应的圈速，平均速度与侧 g 数据。

无空套与带空套区别在于是否安装前翼与尾翼。对比发现，空套使得圈速提升约 0.3s，平均速度提升约 3kph，侧向 g 值提升约 0.1，在数据上有较明显的提升。车手同时反馈空套有效地缓解了定圆测试中的推头现象，提升了他们的测试信心。

5. 制造工艺

5.1 PMI 与 3D Core 芯材数据

1. 3D Core



图表 5.1.1 3D Core 芯材

- 芯材介绍

3D CORE 特殊的蜂窝状六角形结构，拥有两个好处：

1. 它能够**应用**在**比较弯曲的模具**中，确保它用于更复杂外形的部件；如果使用传统的泡沫夹芯，将会比较困难或根本不可能。
2. **结构之间的空隙**可以有一个完美的**气流和树脂流动的通道**，意味着可以为真空树脂导流或者树脂传递成型材料起到流动媒介的作用。

我们目前运用的 3D CORE PET 100 是密度 115kg/m^3 的 PET（聚对苯二甲酸乙二酯）泡沫。它提供了非常好的机械性能，在抗压和抗剪强度与重量/密度方面是目前市场上性能较高的芯材之一。 115kg/m^3 PET 100 夹层比闭孔 PVC 发泡板密度更高，尤其是当蜂窝结构的空隙中吸收了额外树脂后，它的抗压强

度也会大大提高。

- 兼容性

3D CORE PET 100 和所有通用树脂系统兼容。

最大加工温度为 170°C，可以使用运用预浸料的真空袋压工艺。

- 运用工艺

真空树脂导流——极好（树脂流动通道）

手糊工艺——良好

我们目前将芯材适用于碳纤维平板和简单曲面的制造上，既能保证强度也能最大可能降低平板厚度和质量。

2. PMI



图表 5.1.2 PMI 芯材

- 芯材介绍

PMI(聚甲基丙烯酸酰亚胺)泡沫具有非常精细的泡孔结构，因此表面树脂消耗量非常低。其具有两个优势：

1. 包括改善的机械性能(比通常抗压强度高 15%)

2. 更低的表面树脂消耗和更高的加工温度, 使其特别适合预浸料的成型工艺。

- 兼容性

适用于高达 130°C 的高温固化梯度。

兼容所有常见的树脂系统。

- 处理加工

PMI 泡沫适合在预浸料层压制件中共固化。极低的树脂吸收量可以将芯材包含在预压层中, 而无需包入树脂膜或胶膜。

我们目前使用 PMI 泡沫制作所有的翼片: 将碳纤维预浸料包裹覆盖在 PMI 泡沫上, 然后利用真空袋压工艺进行高温固化成型。

5.2 真空袋压工艺

真空袋压工艺是我们目前使用的最多的工艺, 本车的大多数翼片与平板均使用该工艺。

真空袋压工艺的优势在于:

1. 相比于树脂真空导流工艺更方便加工, 并且能给予一个不错的表面结果; 固化时间较快, 效率高。
2. 相比于手糊工艺精准度高, 树脂量可控 (大多数情况下取决于预浸料)

具体制作流程:

1. 将 PMI 芯材用铣床铣出翼型, 清理表面
2. 在 PMI 芯材上进行碳纤维预浸料的铺层, 放入用于连接的铝制预埋件, 并在预埋件处补强

3. 按照脱模布-透气毡-真空袋的顺序包裹零件，抽真空后送入工业烤箱，按照碳纤维预浸料的固化曲线进行固化
4. 脱模后打磨表面，并涂抹清漆，最后打磨并抛光表面。

5.3 树脂导流工艺

树脂真空导流工艺目前运用于使用 3D Core 作芯材的某些简单曲面上。本车的扩散器使用了该工艺。

树脂真空导流工艺的优势在于：

1. 相比于真空袋压工艺，允许利用碳纤维干布进行制作，相比于利用预浸料制作产生架桥的可能性降低。
2. 相比于手糊工艺树脂量易于控制，并且表面质量较好。

具体制作流程：（以扩散器的制作为例）

1. 利用亚克力切割龙骨，易弯曲的铝板作为表面，进行模具的制作，并涂抹脱模剂
2. 按照碳纤维干布-3D Core 芯材-碳纤维干布的顺序进行铺层。
3. 按照脱模布-导流网-螺旋管-真空袋的顺序布置树脂导流管道。
4. 接入树脂收集瓶和真空泵，保证真空袋内的真空度后吸入树脂，直到浸润碳布后关闭真空泵并保持真空，待常温固化。

5.4 模具成型

对于更加复杂的曲面，利用泡沫模具进行玻璃钢翻模再利用真空袋压工艺/树脂真空导流工艺会是一个更好的选择，相比单纯地利用 PMI 芯材制造，他可以给出一个较好

的表面质量，甚至不用涂抹清漆。

5.5 干碳法包边工艺

通过上述工艺制作出来的零件，需要进行组装和粘接。除了利用紧固件和连接件进行组装外，干碳法包边工艺可以利用树脂进行粘接。本车的前翼端板，扩散器端板，后轮前直板与底板进气部分均使用该工艺进行加强。

例如，在两块相互垂直的端板需要粘接时，会在连接处铺上碳纤维干布并刷上树脂，进行常温固化，固化后进行二次打磨保证表面质量。这样制作出来的零件相比利用紧固件连接，不仅保证了零件的一些重要表面（例如底板进气口）的气流不受连接件影响，还减少了应力集中的现象。

5.6 螺栓与紧固件

对于大部分位于需要平滑气流的表面的紧固件，我们采用了盘头内六角螺丝。在 Carrol Smith 所著的书《Tune to Win》中写道，不同紧固件类型对整体的阻力会有比较大的影响，一是其表面本身产生的阻挡阻力，更重要的是在紧固件后面低压区产生的涡流对下流气流的影响。据书中数据，普通柱头内六角会产生 0.8 的阻力系数，而盘头内六角螺丝产生的阻力系数只有近 0.32。而由于使用碳纤维和 3D-Core 芯材制作的较薄的气动套件若打沉头孔会影响到碳纤维件的结构强度，因此我们并没有采用阻力系数更小的沉头螺丝作为主要的紧固件。






	HEX HEAD BOLT $C_D \approx 0.80$
	ROUND HEAD RIVET $C_D \approx 0.32$
	BRAZIER HEAD RIVET $C_D \approx 0.04$
	MACHINE SCREW - FLAT HEAD $C_D \approx 0.02$
	FLUSH RIVET $C_D \approx .002$

Figure (46): Independent drag coefficients of bolt and rivet heads exposed to airstream

图表 5.6.1 螺栓阻力系数